

## REMEDIASI AIR ASAM TAMBANG DENGAN LIMBAH ORGANIK

Oleh

Riwandi dan Ali Munawar

Laboratorium Ilmu Tanah Fakultas Pertanian UNIB

Jalan Raya Kandang Limun Bengkulu

Telp/Fax 0736 21290

### ABSTRAK

Tujuan riset ini adalah menentukan sifat limbah organik, mekanisme remediasi dengan limbah organik, dan memilih jenis limbah organik yang terbaik dalam remediasi air asam tambang. Manfaat riset ini adalah membantu mengurangi pencemaran lingkungan; dan memperkaya ilmu pengetahuan dasar teknik pengendalian air asam tambang. Riset ini dilaksanakan di Laboratorium Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu pada bulan Maret sampai dengan Nopember 2007. Desain percobaan adalah percobaan inkubasi air asam tambang dan limbah organik dalam botol tertutup rapat selama 30 hari. Sifat air asam tambang yang diamati adalah pH, potensial redoks (Eh), daya hantar listrik (DHL), kadar besi- dan sulfat-larut pada waktu hari 1, 7, 14, dan 30 hari. Hasil yang diperoleh sebagai berikut: sifat limbah organik: keasaman (pH) netral (pH 7), kecuali kulit kayu dan serbuk gergaji; daya hantar listrik (DHL) sangat beragam; bahan organik sangat tinggi, kecuali abu batubara; nitrogen total rendah, kecuali kompos lumpur sawit, dan fosfor total rendah, kecuali pupuk kandang; jumlah basa-basa (Na, K, Ca, Mg) rendah, kecuali kompos kulit kayu dan kompos lumpur kayu; dan unsur mikro (Fe, Mn, Zn) sangat beragam. Sifat air asam tambang diperoleh bahwa keasaman (pH) 2.5; DHL 1394  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; kalsium (Ca) 33.73 ppm; magnesium (Mg) 83.31 ppm;  $\text{Fe}^{3+}$  4.45 ppm;  $\text{Fe}^{2+}$  0.06 ppm; aluminium (Al) 7.36 ppm; mangan (Mn) 4.42 ppm; alkalinitas ( $\text{CaCO}_3$ ) 84.21 ppm; dan sulfat ( $\text{SO}_4$ ) 407.28 ppm. Hasil uji mekanisme remediasi dengan limbah organik sebagai berikut: keasaman (pH) meningkat dari 2.5 (pH awal) menjadi netral (7), potensial redoks (Eh) sangat beragam. Daya hantar listrik (DHL) sangat beragam mulai dari rerata terendah 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  sampai dengan tertinggi 9000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , kadar besi larut (Fe) menurun menjadi sangat rendah, dan sulfat ( $\text{SO}_4$ ) terjadi penurunan pada kulit kayu, kompos janjang sawit, dan serbuk gergaji. Kesimpulan yang diperoleh bahwa sifat-sifat limbah organik sangat beragam dan kemampuan remediasinya berlainan satu dengan yang lain. Jenis limbah organik yang terbaik untuk remediasi air asam tambang adalah kulit kayu, kompos kulit kayu, dan serbuk gergaji.

Kata kunci: limbah organik, air asam tambang, remediasi

---

\* Judul makalah disampaikan dalam *Round Table Discussion dan Ehxibition* Penyusunan Rencana Aksi Mitigasi dan Antisipasi Dampak Pemanasan Global di Regional Sumatera dan Kalimantan untuk mewujudkan Ketahanan Pangan. 14 – 15 Maret 2008, Universitas Sriwijaya Palembang.

\*\*) Dosen pada Program Studi Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Unib Bengkulu

## PENDAHULUAN

Air asam tambang, *Acid Mine Drainage* atau *Acid Rock Drainage* adalah bahan pencemar wilayah penambangan batu bara atau bahan mineral lainnya (Zipper & Jage, 2001). Oksidasi batuan pirit ( $\text{FeS}_2$ ) dengan oksigen dan air menghasilkan asam dan logam larut. Air asam tambang dicirikan oleh pH yang rendah, kadar sulfat, logam larut, dan keasaman yang tinggi (Skousen et al. 1996, 1998, 1999, 2000; Sextone et al. 1999, Costello, 2003, Kem, 2004). Reaksi oksidasi batuan pirit diterangkan sebagai berikut:



Oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  ke  $\text{Fe}^{3+}$  terjadi bila ketersediaan oksigen yang larut dalam air cukup.



Besi (III) dapat diendapkan sebagai  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  berwarna merah jambu di dalam air asam tambang atau dapat bereaksi langsung dengan pirit menghasilkan besi (II) dengan menghasilkan asam yang lebih banyak.



Ketika besi (II) dihasilkan (persamaan 4) dan ketersediaan oksigen terlarut cukup, siklus persamaan 2 dan 3 berjalan sempurna. Dengan tidak adanya oksigen terlarut, persamaan 4 akan terus berjalan sempurna (Younger, et al, 2002 dalam Costello, 2003).

Peranan limbah organik adalah penghasil alkalin (bikarbonat) dari reaksi limbah organik dengan sulfat seperti reaksi di bawah ini (Evangelou, 1995; Ditch dan Karathanasis, 1994).



Reduksi satu molekul sulfat menghasilkan dua molekul alkalinitas. Satu molekul sulfida dihasilkan setiap molekul sulfat yang direduksi, dan sulfida ini akan bereaksi dengan logam-larut, menghasilkan logam-logam sulfida yang mempunyai kelarutan rendah, seperti reaksi berikut:



dengan  $\text{Me}^{2+}$  sebagai simbol dari logam divalen (Skousen & Ziemkiewicz, 1996; Drury, 1999).

## METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Maret 2007 sampai dengan Nopember 2007 di Laboratorium Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu. Kulit-kayu (*bark*) dan lumpur kayu (*sludge*) diambil dari PT Tanjung Enim Lestari, Tanjung Enim.

Janjang buah sawit dan lumpur sawit dari PT Perkebunan Bio Nusantara, Bengkulu. Abu batubara (*fly ash*) dari PLTU, Tanjung Enim, serbuk gergaji, dan pupuk kandang ayam dari penggergajian kayu dan peternakan ayam di Bengkulu.

Limbah organik dibersihkan, dikeringkan, dicincang halus, dan diayak dengan ayakan bermata saring 5 mm, dan hasilnya ditampung. Air asam tambang, dari *mainsump* Banko Barat Pit 1 PT BA, Tanjung Enim, yang belum diberi bahan kapur diambil dengan cara dipompa, ditampung di dalam jiregen yang bersih 35 L, ditutup rapat dan dibawa ke laboratorium untuk dianalisis pH, daya hantar listrik (DHL), kalsium (Ca), magnesium (Mg), besi (Fe), mangan (Mn), aluminium (Al), sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ )-larut, dan alkalinitas.

#### a) Menentukan sifat limbah organik

Limbah organik adalah kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK), janjang kelapa sawit (JS), kompos janjang kelapa sawit (KmJS), kompos lumpur janjang kelapa sawit (KmJLS), abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), dan pupuk kandang ayam (PK). Sifat limbah organik dianalisis di Laboratorium Tanah Jurusan Tanah UGM, Yogyakarta.

#### b) Uji Mekanisme Remediasi Limbah Organik

Limbah organik ditimbang 250 g, dimasukkan ke dalam toples plastik berukuran 2,5 L dan ditambahkan AAT 1250 ml. Masing-masing diulang empat kali, total satuan percobaan menjadi 36. Bahan dicampur dengan baik, ditutup rapat dan dibiarkan pada suhu kamar. Setelah 1, 7, 14, dan 30 hari, diukur pH, potensial redoks (Eh), dan daya hantar listrik (DHL). Pada saat pengamatan suspensi AAT diambil untuk analisis kadar Fe-larut, dan sulfat-larut. Pengukuran kadar Fe-larut dan sulfat-larut di Laboratorium Kimia Tanah Balai Penelitian Tanah (BALITTANAH,) Bogor.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Menentukan sifat limbah organik

Tabel 1 menunjukkan bahwa pH limbah organik mendekati netral, kecuali serbuk gergaji dan kulit kayu masing-masing mempunyai pH 4.9 dan 5.5, DHL tinggi kecuali serbuk gergaji (SG) mengandung DHL yang sedang ( $<750\mu\text{S}$ ). Kadar bahan organik tinggi, kecuali abu batubara (AB) yang rendah (3.41%). Nisbah C/N adalah tinggi karena kadar Nitrogen (N) yang relatif rendah ( $<5\%$ ). Kapasitas Pertukaran Kation (KPK) termasuk rendah sampai dengan sedang, Unsur makro (P, K, Ca, Mg, K, dan Na) sangat rendah, kecuali janjang buah sawit (kadar K tinggi), dan pupuk kandang (kadar P tinggi). Unsur mikro (Fe, Mn, dan Zn) digolongkan rendah sampai dengan tinggi.

Tabel 2 menunjukkan bahwa contoh AAT mempunyai pH 2.5 (sangat asam), DHL  $1394\mu\text{S/cm}$ , kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) masing-masing 33.73 dan 83.31 ppm, alkalinitas (sebagai  $\text{CaCO}_3$ ) 84.21 ppm, sulfat ( $\text{SO}_4$ ) 407.28 ppm (sangat tinggi), Aluminium (Al) 7.36 ppm, besi (III) 4.45 ppm, besi (II) 0.06 ppm, dan Mn 4.42 ppm.

Keasaman (pH) sangat rendah mengindikasikan bahwa AAT mengandung mineral pirit. Mineral pirit dijumpai di *mainsumps* Banko Pit I PTBA ketika penulis survei ke lokasi tambang. Mineral pirit terdapat pada batuan beku yang berwarna kekuningan. Kadar sulfat ( $\text{SO}_4$ ) AAT sangat tinggi menunjukkan bahwa oksidasi pirit telah terjadi dengan dihasilkannya sulfat yang sangat tinggi. Sedangkan kadar besi (III)

4.45 ppm dan besi (II) 0.06 menunjukkan bahwa terjadi oksidasi pirit menghasilkan hidrogen dan sulfat.

Tabel 1 . Hasil analisis laboratorium sifat limbah organik

No.	Kode	pH H <sub>2</sub> O	DHL mS	C org. %	BO %	N total %	P total %	KPK me/100 g	K total %	Ca %	Na total %	Mg %	Fe %	Mn total ppm	Zn ppm
1	KK	5,5	3,65	43,58	75,14	0,22	0,23	29,79	0,24	0,58	0,17	0,16	0,35	117,07	6,88
2	KMKK	7,3	8,82	31,35	54,04	1,28	0,49	35,25	0,39	5,60	0,78	0,43	0,01	96,48	248,69
3	KMLK	7,7	9,50	12,45	21,46	0,36	0,49	27,86	0,70	4,28	0,59	0,36	2,09	612,49	116,69
4	JS	6,7	27,00	54,29	93,61	0,04	0,37	13,80	1,19	0,15	0,65	0,64	0,07	53,27	77,43
5	KMJS	6,6	13,30	54,21	93,46	0,62	0,40	22,21	0,76	0,36	0,16	0,40	0,16	94,41	55,65
6	KMLS	6,0	10,00	48,00	82,75	3,20	0,71	24,40	0,74	0,74	0,14	0,53	0,46	166,95	117,83
7	AB	7,8	1,65	1,98	3,41	1,36	0,37	5,68	0,12	0,16	0,38	0,39	0,97	194,36	18,70
8	SG	4,9	0,70	55,83	96,25	0,69	0,27	31,59	0,06	0,18	0,14	0,08	0,18	4,79	42,05
9	PK	7,8	16,45	20,02	34,52	0,95	2,16	18,59	1,02	0,72	0,53	0,74	1,36	417,22	283,36

Keterangan: JS= janjang kelapa sawit; SG= serbuk gergaji; KMJS= kompos janjang kelapa sawit; AB= abu batubara; KK= kulit kayu; PK= pupuk kandang; KMKK= kompos kulit kayu; KMLK= kompos lumpur kayu; KMLS= kompos lumpur janjang kelapa sawit.

Sumber: Laboratorium Jurusan Tanah Fakultas Pertanian UGM pada tanggal 24 September 2007

Tabel 2 . Hasil analisis laboratorium air asam tambang (Sampel AAT tanpa diberi HNO<sub>3</sub>)

No.	Sifat	Ulangan			Rerata
		1	2	3	
1.	pH	2.5	2.5	2.5	2.50
2.	DHL (μS/cm)	1394	1394	1394	1394.00
3.	Ca (ppm)	33.612	34.634	32.93	33.73
4.	Ferri (ppm)	4.582	4.402	4.351	4.45
5.	Ferro (ppm)	0.056	0.061	0.054	0.06
6.	Mg (ppm)	82.623	83.852	83.443	83.31
7.	Mn (ppm)	4.447	4.323	4.501	4.42
8.	Al (ppm)	7.56	7.198	7.319	7.36
9.	Alkalinitas ( CaCO <sub>3</sub> )	84	86.48	82.227	84.21
10.	SO <sub>4</sub> (ppm)	410.211	401.408	410.211	407.28

### Uji Mekanisme Remediasi Limbah Organik

#### Keasaman (pH)

Gambar 1-3 menunjukkan bahwa pH air asam tambang secara keseluruhan meningkat dari pH 2.5 (awal) menjadi >6 dengan limbah organik. Limbah organik mampu menetralkan air asam tambang dengan tersedianya basa-basa (Na, K, Ca, Mg) dan bahan organik yang relatif tinggi jumlahnya sehingga ion H sebagai sumber keasaman air asam tambang diikat oleh basa-basa dan bahan organik. Alasan lain adalah bahan organik

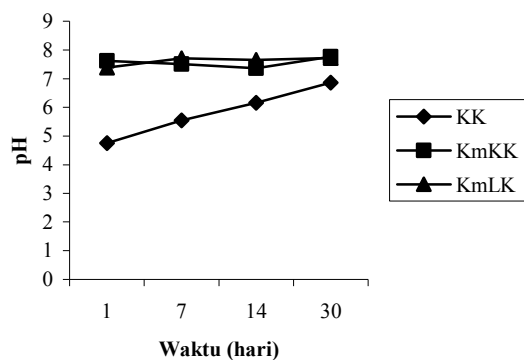
bereaksi dengan sulfat dari air asam membentuk bikarbonat (basa) sehingga pH air dapat menjadi netral (persamaan 5). Hal yang menarik perhatian adalah kulit kayu dan serbuk gergaji karena terjadi peningkatan pH dari 4 menjadi pH >6, sedangkan limbah organik yang lain tidak menunjukkan hal yang serupa. Karena proses netralisasi air asam tambang berjalan dengan berangsur-angsur meningkat. Kulit kayu dan serbuk gergaji mempunyai kadar bahan organik dan kapasitas tukar kationnya relatif tinggi. Hal ini memberikan kemampuan ke dua limbah organik tersebut untuk melakukan netralisasi air asam tambang. Netralisasi dapat berjalan dengan berbagai macam cara, antara lain jerapan ion H pada tapak jerapan bahan organik, atau netralisasi asam dengan basa, atau terjadi kilasi antara logam Fe, Mn, Al dengan bahan organik. Kesimpulannya bahwa limbah organik mampu menetralkan air asam tambang.

#### Potensial Redoks (Eh)

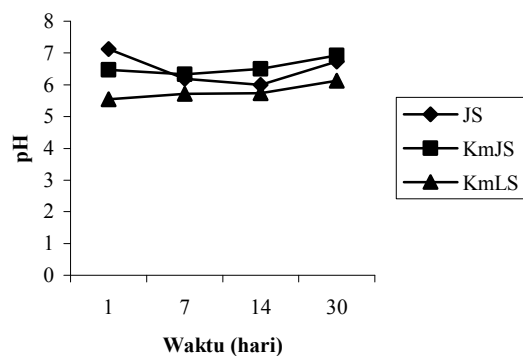
Hubungan Eh dan waktu inkubasi limbah organik dalam air asam tambang disajikan dalam Gambar 4-6. Gambar tersebut menunjukkan bahwa mula-mula Eh menurun dari hari pertama ke hari 7, tetapi kemudian meningkat perlahan sampai dengan hari ke 14. Hal yang menarik adalah meskipun terjadi peningkatan Eh sampai hari ke 14, tetapi masih di bawah angka +180 mV. Proses reduktif terus berlangsung meskipun lambat. Hal yang sangat menarik bahwa angka Eh suspensi air asam tambang – janjang sawit, kompos janjang sawit, kompos lumpur sawit adalah negatif mulai dari nol sampai dengan -120 mV. Hal ini menunjukkan bahwa suasana reduktif yang tercipta karena pengaruh limbah organik tersebut. Namun perlu diperhatikan bahwa angka Eh KmLS terus meningkat mulai dari hari pertama sampai dengan hari ke 14. Dalam keadaan reduktif (lihat Gambar 6) unsur yang tereduksi adalah besi (II), Zn (II), Al (III). Gambar 6 menunjukkan bahwa Eh negatif terjadi pada PK, sedangkan Eh positif terjadi pada AB dan SG. Penurunan Eh terjadi dari 400 mV menjadi 100 mV pada AB dan SG mulai hari pertama sampai hari ke 7, kemudian angka Eh stabil pada angka 100 mV sampai hari ke 30. Penurunan angka Eh tidak terjadi pada PK mulai hari pertama sampai dengan hari ke 30 Eh relatif stabil pada angka -100 sampai dengan -200 mV. Logam besi, aluminium, mangan, dan sulfat larut dijumpai pada Eh -100 sampai -200 mV.

#### Daya Hantar Listrik (DHL)

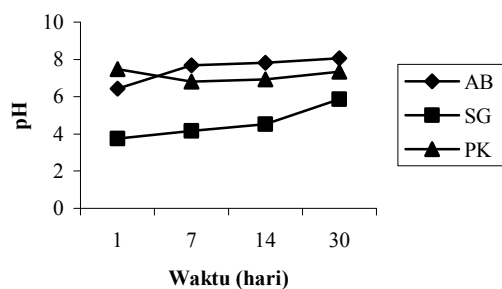
Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi limbah organik dalam air asam tambang disajikan dalam Gambar 7-9. Penurunan DHL terjadi pada kulit kayu (KK) dari 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  menjadi <1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Karena imbalanced basa dan asam yang kecil, basa-basa dipakai untuk menetralkan asam sehingga basa-basa atau garam terlarut di dalam air asam tambang menjadi berkurang. Hal ini berlaku untuk semua limbah organik kecuali pupuk kandang (PK) yang tetap tidak terpengaruh air asam tambang. Kesimpulan yang diperoleh bahwa DHL semua limbah organik tidak dipengaruhi oleh air asam tambang, walaupun ada hanya kecil pengaruhnya dan jumlah DHLnya ditentukan oleh jumlah DHL limbah organik yang berada di dalam air asam tambang.



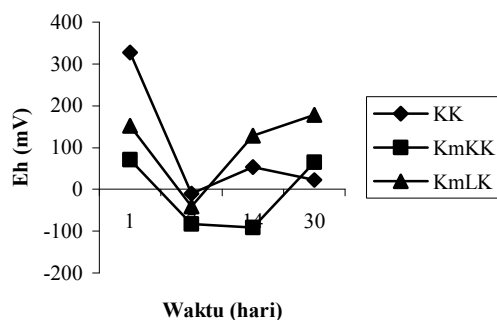
Gambar 1. Hubungan antara pH dan waktu inkubasi kulit kayu, kompos, lumpur kayu dalam AAT



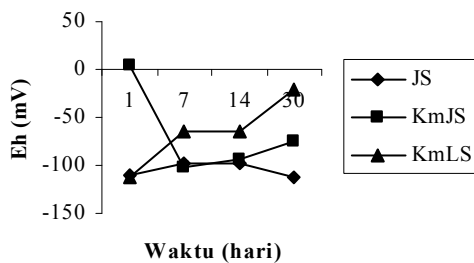
Gambar 2. Hubungan antara pH dan waktu inkubasi janjang sawit, kompos, lumpur AAT



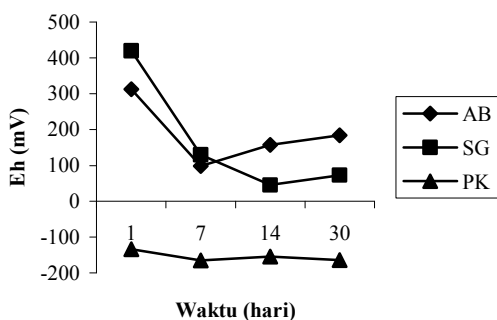
Gambar 3. Hubungan antara pH dan waktu inkubasi abu batubara, serbuk gergaji, pupuk kandang dalam AAT



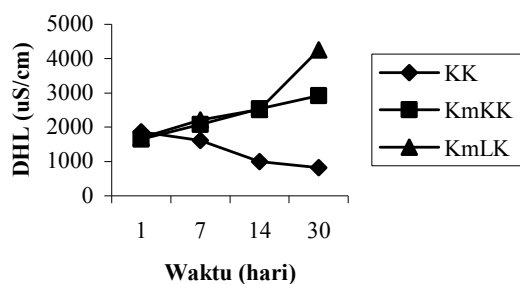
Gambar 4. Hubungan antara Eh dan waktu inkubasi kulit kayu, kompos, Lumpur kayu dalam AAT



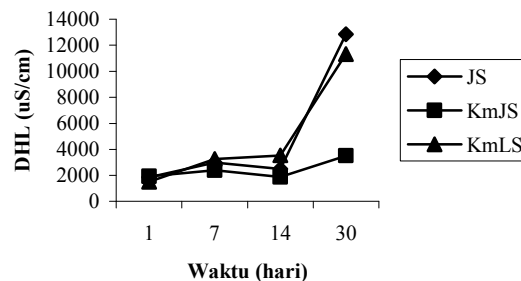
Gambar 5. Hubungan antara Eh dan waktu inkubasi janjang sawit, kompos, Lumpur dalam AAT



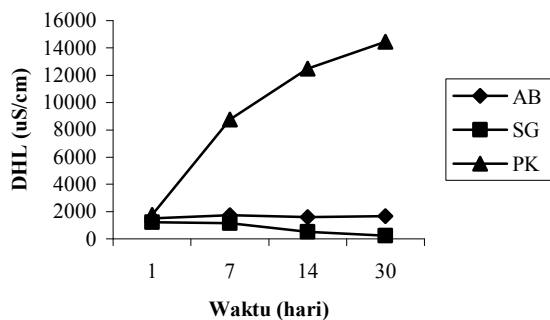
Gambar 6. Hubungan antara Eh dan waktu inkubasi abu batubara, serbuk gergaji, pupuk kandang dalam AAT



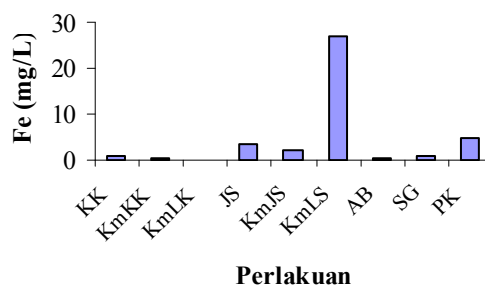
Gambar 7. Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi kulit kayu, kompos, lumpur kayu dalam AAT



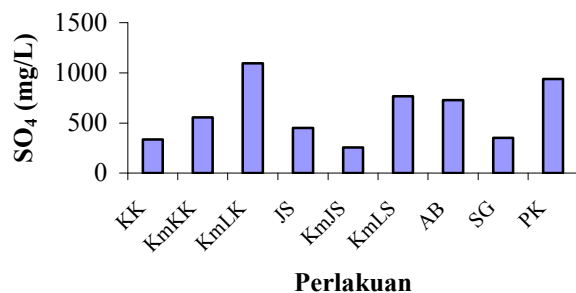
Gambar 8. Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi janjang sawit, kompos, lumpur dalam AAT



Gambar 9. Hubungan antara Eh dan waktu inkubasi abu batubara, serbuk gergaji, pupuk kandang dalam AAT



Gambar 10. Kadar Fe-larut pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam AAT selama 14 hari (16 contoh)



Gambar 11. Kadar SO<sub>4</sub>-larut pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam AAT selama 14 hari (16 contoh)



### Besi- dan Sulfat-larut air asam tambang

Gambar 10 menunjukkan bahwa kadar Fe masing-masing limbah organik dapat diurutkan dari terbesar ke terendah adalah KmLS > PK > JS > KmJS > KK = SG > AB > KK > KmKK = KmLK. Kalau dipilahkan limbah organik yang mempunyai kadar Fe yang sangat rendah adalah SG, AB, KK, KmKK, dan KmLK. Artinya bahwa limbah organik yang terakhir ini mampu menurunkan kadar Fe larut air asam tambang. Kemudian disusul dengan limbah organik lain yang kadar Fe larut <5 mg/L adalah KmJS, JS, dan PK. Kadar Fe larut mencapai >25 mg/L dijumpai pada KmLS.

Gambar 11 menunjukkan bahwa distribusi sulfat limbah organik dalam air asam tambang dari kadar tertinggi ke terendah sebagai berikut: KmLK > PK > KmLS > AB > KmKK > JS > SG > KK > KmJS.

### KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa: Masing-masing limbah organik mempunyai sifat kimia yang berbeda terutama pH, DHL, C-organik, N-total, P-total, KTK, basa tertukar, unsur mikro. Air asam tambang mempunyai keasaman (pH) 2.5; DHL 1394  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; kalsium (Ca) 33.73 ppm; magnesium (Mg) 83.31 ppm;  $\text{Fe}^{3+}$  4,45 ppm;  $\text{Fe}^{2+}$  0.06 ppm; aluminium (Al) 7.36 ppm; mangan (Mn) 4.42 ppm; alkalinitas ( $\text{CaCO}_3$ ) 84.21 ppm; dan sulfat ( $\text{SO}_4$ ) 407.28 ppm. Uji mekanisme remediasi bahan organik terhadap air asam tambang diperoleh kesimpulan bahwa limbah organik dapat mengurangi keasaman, suasana redok potensial lebih dominan, dengan daya hantar listrik yang beragam, kadar Fe menurun sampai < 1 ppm, juga sulfat larut menurun. Remediasi air asam tambang dengan kulit kayu, kompos kulit kayu, dan serbuk gergaji memberikan yang terbaik.

Saran remediasi air asam tambang di lapangan dengan menggunakan kulit kayu, kompos kulit kayu, dan serbuk gergaji dalam mekanisme pengendalian pasif (*passive treatment*) air asam tambang.

### DAFTAR PUSTAKA

- Costello, C. 2003. Acid mine drainage: Innovative treatment technologies. U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovative Office Washington, DC [www.clu-in.org](http://www.clu-in.org)
- Ditch, D.C., and A.D. Karathanasis. 1994. Wetlands: Mechanisms for Treating Acid Mine Drainage, Agronomy Notes. University of Kentucky, Kentucky State University, U.S. Department of Agriculture, and Kentucky Counties Cooperating.
- Drury, W. J. 1999. Treatment of acid mine drainage with anaerobic solid substrate reactors. A research note prepared for: Water Environment Research, February 19, 1999.
- Evangelou, V.P. (Bill). 1995. Pyrite oxidation and control. CRC Press, Boca Raton. 285p+.
- Kem, 2004. Informasi air asam tambang. Lembar Fakta. <http://www.keliangold.com>.
- Sexstone, J., J.G. Skousen, J. Calabrese, D.K. Bhumbra, J. Cliff, J.C. Sencindiver, and G.K. Bissonnette. 1999. Iron removal from acid mine drainage by wetland. In

- 1999 Proceedings of American Society for Surface Mining and Reclamation (ASSMR) 16<sup>th</sup> Annual Meeting in Conjunction with Western Region Ash Group 2<sup>nd</sup> Annual Forum: Mining and Reclamation for the Next Millennium, Scottsdale, Arizona, August 13-19, 1999. Volume 2:609-620.
- Skousen, J., A. Sexstone, K. Garbutt, and J. Sencinder. 1996. Passive treatment of acid mine drainage. In J. G. Skousen and P. F. Ziemkiewicz. (Comp.). Acid mine drainage control and treatment. 2<sup>nd</sup> ed. West Virginia University and the National Mine Land Reclamation Center, Morgantown, WV. p: 249-260.
- Skousen, J.G., and P. Ziemkiewicz. 1996. Acid mine drainage control and treatment. 2<sup>nd</sup> ed. West Virginia and National Mine Land Reclamation Center, Morgantown, West Virginia. 362p+
- Skousen, J. 1998. Overview of passive systems for treating acid mine drainage. The second section in "Acid Mine Drainage Control and Treatment, a chapter in "Reclamation of Drastically Disturbed Lands". American Soc. for Agronomy and American Soc. for Surface Mining and Reclamation. West Virginia University Ext. Service. USA.
- Skousen, J., A. Sexstone, J. Cliff, P. Sterner, J. Calabrese, and P. Ziemkiewicz. 1999. Acid mine drainage treatment with a combined wetland/anoxic limestone drain:Greenhouse and Field Systems. In 1999 Proceedings of American Society for Surface Mining and Reclamation (ASSMR) 16<sup>th</sup> Annual Meeting in Conjunction with Western Region Ash Group 2<sup>nd</sup> Annual Forum: Mining and Reclamation for the Next Millennium, Scottsdale, Arizona, August 13-19, 1999. Volume 2:621-633.
- Younger, Paul, Banwart, Steven A, Hedin, Robert, S. 2002. Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation. The Netherlands: Kluwer Academic Press.
- Zipper, C, C. Jage. 2000. Passive treatment of acid-mine drainage with vertical-flow systems. Virginia Tech Virginia Polytechnic Institute and State University. <http://www.ext.vt.edu/pubs/mines/460-133/figure1.html>